

GaAs 衬底上氮化硅钝化层的低温制备工艺研究

吴涛 江先锋

中国科学院苏州生物医学工程技术研究所半导体光电子技术研究室, 江苏 苏州 215163

摘要 为了获得应用于 AlGaAs 激光器上的优异的氮化硅薄膜, 采用等离子增强化学气相沉积(PECVD)低温条件下在 GaAs 衬底上制备了不同参数的氮化硅薄膜, 利用光学膜厚仪、原子力显微镜(AFM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)等技术对薄膜残余应力、表面形貌、折射率等进行了分析。结果表明, 薄膜的残余应力随沉积功率的增加而变大; 随气压先降低后变大, 在 200 Pa 时仅为 6 MPa。薄膜的表面粗糙度随功率的提高而变大; 随气压的提高而减小。功率和气压对薄膜的折射率影响不大, 均在 2.0~2.2 之间。薄膜中氢的存在形式为 N-H 键。选择合适的功率和气压, 可以在低温下获得极低应力和优异表面形貌的氮化硅薄膜。

关键词 激光器; 等离子增强化学气相沉积; 氮化硅薄膜; 低温; 残余应力; 表面粗糙度

中图分类号 TN305

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.031403

Fabrication Process Study of Silicon Nitride Passivation Layer on GaAs Substrate at Low Temperature

Wu Tao Jiang Xianfeng

Department of Semiconductor Optoelectronics Technology, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

Abstract In order to obtain the excellent silicon nitride (SiN) films in AlGaAs laser, SiN films with different deposition parameters are fabricated on GaAs substrate by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) at low temperature. The residual stress, surface morphology and refractive index of these films are investigated comprehensively by means of refractometer, atomic force microscope (AFM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results show that residual stress of SiN films increases with the deposition power. An ultra low stress (6 MPa) is obtained at the pressure of 200 Pa. The AFM results show that the surface roughness increases with the deposition power, while decreases with the deposition pressure. Both the deposition power and the pressure have a weak effect on the refractive index. The refractive index of all these films are 2.0~2.2. The FTIR results show that the H element exists in the film with the N-H bond. SiN films with ultra low stress and good surface morphology can be obtained by selecting proper power and pressure at low temperature.

Key words lasers; plasma enhanced chemical vapor depositoin; silicon nitride films; low temperature; residual stress; surface roughness

OCIS codes 140.5960; 310.1860; 310.5696

1 引言

氮化硅薄膜由于优良的物理化学稳定性、电学性能、光学性能以及良好的绝缘性已被广泛地应用于太阳能电池、光电子和微电子等领域中。在实际应用中, 氮化硅薄膜可作为掩膜、绝缘层和钝化层等。例如, 在太阳能电池领域中, 氮化硅薄膜被用作减反射材料和钝化材料^[1-4]。在微机电系统(MEMS)领域中, 氮化硅薄膜则被用作器件的结构材料、敏感材料和掩蔽层^[5-6]。在薄膜晶体管液晶显示(TFT-LCD)领域, 氮化硅薄膜则被用作作为 TFT-LCD 的栅绝缘层材料^[7-12]。在 AlGaAs 半导体激光器中, 氮化硅薄膜可以被用作很好的

收稿日期: 2014-09-09; 收到修改稿日期: 2014-10-16; 网络出版日期: 2015-01-29

基金项目: 国家 863 计划、苏州市科技发展技术项目(SH2014024)

作者简介: 吴涛(1985—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事半导体激光器制备和应用方面的研究。E-mail: wut@sibet.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

钝化层。与常用的SiO₂薄膜相比,氮化硅薄膜具有更高的导热系数和更好的散热效果,从而可以降低器件因散热问题而引起的失效^[13]。

目前,制备氮化硅薄膜的方法主要有热分解法,直接氮化法,低压化学气相沉积^[14](LPCVD)和等离子增强化学气相沉积(PECVD),此外还有蒸发镀膜和溅射镀膜法^[15-17]。蒸发和溅射法所沉积的氮化硅薄膜组织结构疏松,致密度较差。LPCVD法制备氮化硅薄膜时沉积温度较高,一般在600℃以上。这对于不能进行高温处理的AlGaAs半导体激光器芯片显然是不合适的。而PECVD由于具有沉积温度相对低、薄膜均一性好、台阶覆盖性好以及缺陷密度较低等优点,成为制备氮化硅薄膜的首选。

在AlGaAs半导体激光器中,氮化硅薄膜在GaAs和P面金属层之间充当钝化层。氮化硅薄膜的内应力、表面组织形貌、致密度以及粗糙度等均会影响到器件的性能和寿命。而PECVD沉积氮化硅时的沉积功率和反应气压等均会影响到薄膜的质量,因此必须优化好各个工艺参数才能获得满足器件要求的氮化硅薄膜。本文在GaAs衬底上和低温条件下(150℃)制备了不同工艺条件的氮化硅薄膜,重点研究沉积功率和反应气压对氮化硅薄膜内应力、表面形貌、沉积均匀性、折射率以及化学键结构的影响规律,为氮化硅薄膜低温制备技术和AlGaAs激光器生产应用方面提供了重要的数据参考。

2 实验部分

氮化硅薄膜的沉积在CC-200型PECVD设备上。实验用的衬底材料为<100>晶向的n型GaAs[3 inch(7.62 cm)]。衬底片先依次在热的丙酮、甲醇和异丙醇溶液中各清洗10 min,之后用大量去离子水冲洗,最后放入甩干机,通入热的氮气将其甩干。甩干后的衬底片装入PECVD设备的进样室。氮化硅薄膜的沉积体系采用SiH₄-NH₃-N₂系统,流量分别为SiH₄ 300 sccm(标准状态下300 mL/min),NH₃ 23 sccm, N₂ 330 sccm。基片与上电极的距离固定为11 mm。氮化硅沉积厚度均为200 nm。其他沉积条件如表1所示。

表1 氮化硅薄膜的沉积工艺参数表
Table 1 Deposition parameters of SiN thin films

Temperature /℃	Power /W	Pressure /Pa
150	50、100、150、200、300	130
150	200	80、90、130、180、200、210

氮化硅薄膜的厚度和折射率在F40型Filmetric薄膜测试仪上测定。其中,薄膜折射率取波长为632.8 nm时的值。氮化硅薄膜应力的测定在Veeco Dektak 150型轮廓仪上进行。先用轮廓仪测出GaAs衬底片在沉积氮化硅薄膜前后的曲率半径,再通过Stoney公式计算出相应的应力^[18-19]。

$$\sigma = \frac{Et^2}{6d(1-\gamma)} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (1)$$

式中 σ 表示薄膜的应力, E 为GaAs衬底片的杨氏模量(85.3 GPa), t 为GaAs衬底片的厚度(130 μm), d 为氮化硅薄膜的厚度(200 nm), γ 为GaAs的泊松比(0.31), R_1 和 R_2 分别为沉积氮化硅薄膜前后GaAs衬底的曲率半径。

氮化硅薄膜的表面形貌和微组织结构表征在原子力显微镜(AFM, ICON, Bruker)上进行。薄膜的傅里叶变换红外吸收曲线用Agilent FTIR-660型红外光谱仪来测定,扫描范围为1000~4000 cm^{-1} 。

3 结果与讨论

3.1 应力分析

降低薄膜的残余应力是薄膜制备工艺的重要挑战。残余应力过大容易导致器件机械损坏和结合失效,影响器件的可靠性和寿命,降低器件的成品率,这在集成度高的微机电系统中表现得尤为突出^[20]。在AlGaAs半导体激光器制作流程中,氮化硅薄膜沉积到GaAs和AlGaAs表面后,还要经过光刻、刻蚀、金属沉积、研磨抛光及高温退火等很多步工艺^[21-22]。如果在沉积时氮化硅薄膜有较高的残余应力,那么在后续的加工步骤中,氮化硅薄膜很容易因应力过大而发生脱膜问题。因此,要获得内应力尽可能小的氮化硅薄膜。用PECVD沉积氮化硅薄膜时,沉积时的工艺条件(如沉积功率、沉积气压)均会对薄膜的内应力产生重大影响。因此,很有必要研究沉积工艺参数对氮化硅薄膜内应力的影响规律。

图1为不同沉积功率下薄膜残余应力与功率的关系图。从图1可知,氮化硅薄膜内应力随功率的增大而显著变大,且为张应力。沉积功率为50 W时,氮化硅薄膜的内应力较小,仅为11 MPa。而当沉积功率增加到100 W时,薄膜内应力显著增大,达到356 MPa。沉积功率为300 W时,薄膜内应力高达667 MPa。在PECVD生长氮化硅薄膜的过程中,首先是 SiH_4 和 NH_3 在等离子体的作用下生成一系列的胺基硅前驱物,主要有 SiNH_2 、 $\text{Si}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Si}(\text{NH}_2)_3$ 和 $\text{Si}(\text{NH}_2)_4$ 。胺基硅前驱物在能量的驱动下扩散迁移到GaAs基底表面,接着前驱物会优先迁移到基底表面那些自由能最低的地方,最后通过吸附、键和和热分解的方式生长成氮化硅薄膜。在生长过程中,沉积功率越大,形成的胺基硅前驱物则会越多,能量越高,并以更快的扩散速度沉积到基底表面。而此时基底表面那些还没迁移到最低自由能位置的前驱物则会提前被新扩散过来的前驱物所覆盖,这将使氮化硅薄膜内部形成较多的空洞和位错等缺陷,在宏观上表现为薄膜的内应力。因此,在其他条件不变时,沉积功率越高,氮化硅薄膜生长越快,薄膜内部缺陷也越多,最终薄膜具有较大的内应力。

图2为不同沉积气压下氮化硅薄膜残余应力与气压的关系图。由图2可知,沉积气压较小为90 Pa时,氮化硅薄膜的张应力很大达到538 MPa。随着沉积气压的不断增大,氮化硅薄膜的张应力逐渐变小。沉积气压为200 Pa时,氮化硅薄膜的张应力降低至仅为6 MPa。出现该现象可以由离子轰击效应来解释。 SiH_4 和 NH_3 在等离子体作用下生成胺基硅前驱物,在前驱物扩散到GaAs表面的同时,沉积室的其他离子、原子和原子团也会在电场的作用下轰击基底表面,从而造成氮化硅薄膜产生一些内部缺陷。沉积气压增大时,轰击离子和其他离子之间的碰撞几率变大,平均自由程缩小,最终轰击离子以较低的能量轰击到基底表面。因此,形成的氮化硅薄膜内部缺陷减少,薄膜内应力降低。但是,沉积气压从200 Pa增大到210 Pa,薄膜内应力变为负值,绝对值增大,此时薄膜内应力形式由张应力转变为压应力^[23]。

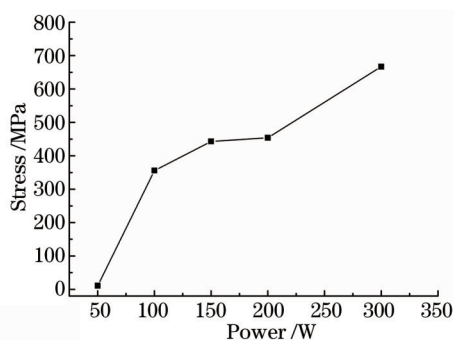


图1 不同沉积功率下氮化硅薄膜的残余应力

Fig.1 Residual stress of SiN films as a function of different deposition powers

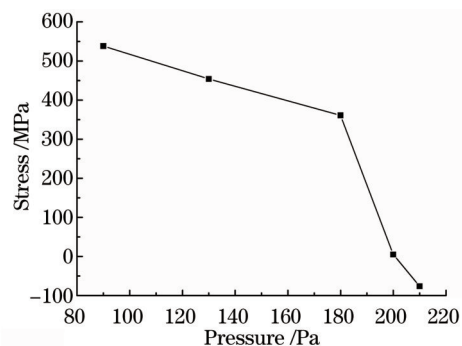


图2 不同沉积气压下氮化硅薄膜的残余应力

Fig.2 Residual stress of SiN films as a function of different deposition pressures

3.2 微观形貌分析

在AlGaAs激光器件的制作流程中,氮化硅被用作钝化层沉积到经过光刻工艺的GaAs外延片上,接着通过光刻腐蚀方法将特定区域的氮化硅去除掉,然后沉积若干层金属薄膜(例如,Ti/Pt/Au)形成器件的P面电极。器件P面电极以外的区域其结构则为GaAs/SiN/Ti/Pt/Au。因此,一方面需要尽量控制氮化硅薄膜的残余应力来保证氮化硅与GaAs有良好的机械结合,另一方面则要提高氮化硅薄膜与金属层之间的粘附性能。除了金属薄膜的沉积方法和条件外,氮化硅薄膜的表面形貌和微观结构也会影响两者之间的结合性能。一个均一光滑平整的表面更有利于薄膜之间的粘合。

图3为不同功率下氮化硅薄膜的AFM三维(3D)照片和表面粗糙度关系图。由图3可知,氮化硅薄膜的晶粒尺寸和表面粗糙度均随沉积功率的提高而变大。功率为50 W时,氮化硅薄膜表面粗糙度约为1.89 nm;沉积功率提高到200 W时,氮化硅薄膜表面粗糙度为5.37 nm。沉积功率变大,胺基硅前驱物以更快的速度迁移扩散到GaAs表面,容易导致GaAs表面的那些前驱物在还没有形成均一、平整界面时就被覆盖,最终形成的氮化硅薄膜表面粗糙度偏大。图4为不同气压下沉积的氮化硅薄膜的AFM 3D形貌照片以及相应的表面粗糙度值。从图可知,随着沉积气压的增大,氮化硅薄膜表面粗糙度逐渐变小。沉积气压为90 Pa时,薄膜表面粗糙度为6.74 nm;而当气压增大到210 Pa时,薄膜表面粗糙度降低至2.53 nm。沉积气压变大,非反应原子(离子)的平均自由程会变小,对GaAs表面(包括表面吸附的胺基硅)的轰击效应也随之减弱。前驱物

能在相对温和的环境下在 GaAs 表面迁移、键和和分解,最终形成的氮化硅薄膜表面较为均一平整。

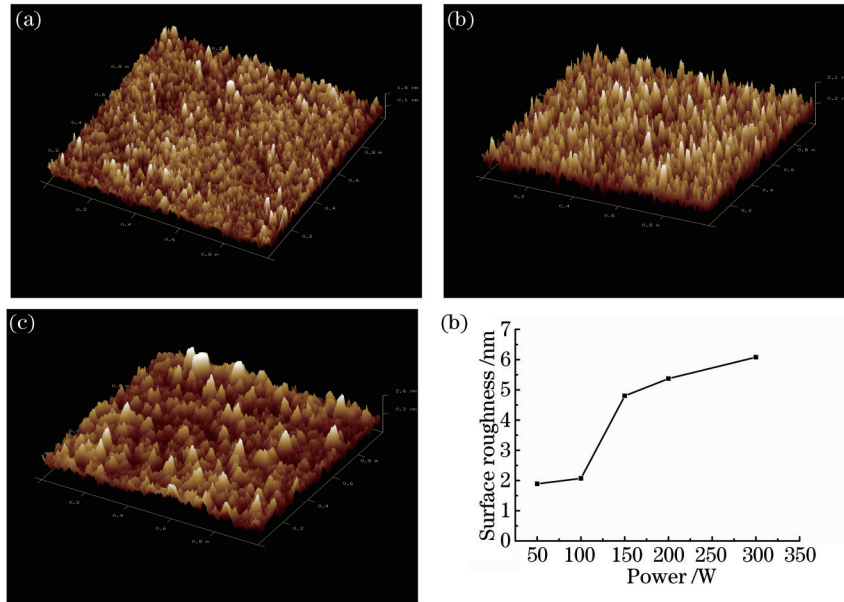


图3 不同功率下氮化硅薄膜的AFM 3D照片和表面粗糙度变化图。(a) 50 W; (b) 100 W; (c) 200 W; (d) 表面粗糙度变化
Fig.3 AFM 3D images and surface roughness of SiN films deposited at different powers. (a) 50 W; (b) 100 W; (c) 200 W; (d) change of surface roughness

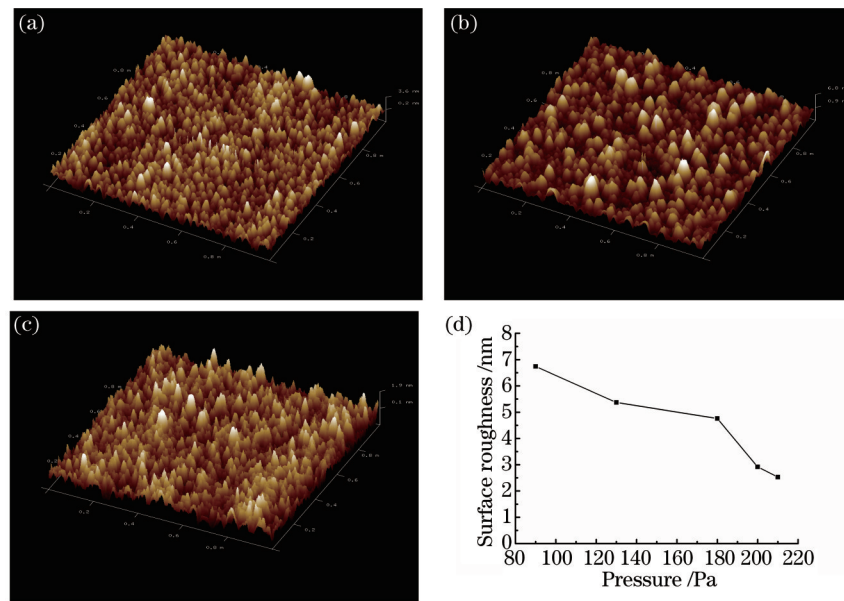


图4 不同气压下氮化硅薄膜的AFM 3D照片和表面粗糙度变化图。(a) 90 Pa; (b) 180 Pa; (c) 210 Pa; (d) 表面粗糙度变化
Fig.4 AFM 3D images and surface roughness of SiN films deposited under different pressures. (a) 90 Pa; (b) 180 Pa; (c) 210 Pa; (d) change of surface roughness

3.3 折射率分析

理论上讲,理想的氮化硅薄膜其Si和N原子比为3:4,此时薄膜的折射率约为2.0。但是,PECVD所沉积的氮化硅薄膜中Si和N的相对含量会因沉积条件的差异而不同,并且薄膜中含有不同程度的氢。因此,PECVD制备的氮化硅薄膜其折射率也因沉积条件的差异而不同,一般在1.8~2.5之间^[24]。图5(a)为不同沉积功率下氮化硅薄膜的折射率变化图。从图5(a)可知,在50 W和100 W的较低功率下,氮化硅薄膜的折射率稍偏大,在2.15~2.20之间。沉积功率在150 W到300 W之间时,薄膜折射率变化不大趋于稳定,并且很接近2.0,在2.02~2.07之间。图5(b)为不同沉积气压下氮化硅薄膜的折射率变化图。沉积气压从90 Pa增大到180 Pa过程中,薄膜折射率变化不大,在2.04~2.09之间。而气压达到200 Pa后,薄膜折射率略有增大。氮

化硅薄膜折射率的影响因素较多,包括内应力、晶粒大小、材料纯度、氢含量及化学键强度等。在改变沉积功率或沉积气压时,氮化硅薄膜的上述理化数值均会随之变化,最终影响薄膜的折射率。因此,这也很难确定单个影响因素对薄膜折射率变化的贡献比率和影响规律。

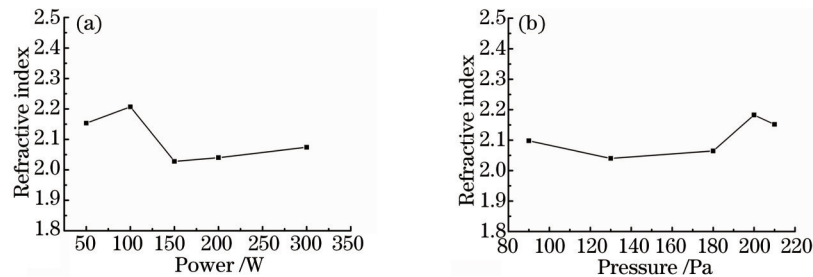


图5 不同功率和气压下氮化硅薄膜的折射率。(a) 不同功率;(b) 不同气压

Fig.5 Refractive index of SiN films as a function of the different deposition powers and pressures.

(a) Different powers; (b) different pressures

3.4 傅里叶变换红外光谱分析

采用PECVD方法沉积的氮化硅薄膜一般会引入氢元素。由于氢的引入,使得氮化硅薄膜化学键结构变得复杂,除了主要的Si—N键外,还含有Si—H、N—H和Si—N—Si这几种键。傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)是分析薄膜中化学键结构的一种很有效的方法。不同的化学键结构在FTIR吸收光谱曲线上的吸收峰位置有所不同。PECVD氮化硅薄膜中的Si—N键一般有两种类型的峰,分别为 883 cm^{-1} 左右的吸收振动峰和 825 cm^{-1} 左右的伸缩振动峰。薄膜中氢的存在形式有Si—H键和N—H键两种。Si—H键在FTIR光谱曲线的 2170 cm^{-1} 处表现为伸缩振动峰;而N—H键除了在 1176 cm^{-1} 处有弯曲振动峰外,还有 3346 cm^{-1} 处的伸缩振动峰。为此,重点分析了氮化硅薄膜中氢的存在情况。图6为不同功率和不同气压下沉积的氮化硅薄膜的FTIR吸收光谱图。由图可知,所有氮化硅薄膜均在 1176 cm^{-1} 处出现了较为明显的N—H键弯曲振动峰;而在 3346 cm^{-1} 处的N—H键伸缩振动峰却很弱。值得注意的是,FTIR曲线上并没有出现Si—H键在 2170 cm^{-1} 处的伸缩振动峰。因此,氮化硅薄膜中氢的存在形式为N—H键,振动模式以弯曲振动为主。

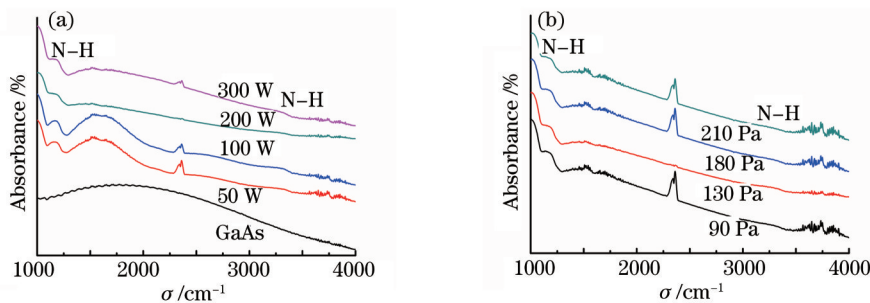


图6 不同条件下沉积的氮化硅薄膜的FTIR曲线。(a) 不同功率;(b) 不同气压

Fig.6 FTIR curves of the SiN films deposited at different conditions. (a) Different powers; (b) different pressures

3.5 沉积均匀性分析

图7为氮化硅薄膜在不同沉积功率下的生长速率以及沉积均匀性曲线图。由图7可知,氮化硅薄膜的沉积速率随着沉积功率的变大而增大。这是因为沉积功率越大, SiH_4 和 NH_3 分解形成的胺基硅前驱物就越多,在相同时间内扩散到基底表面的前驱物也越高,生成的氮化硅薄膜越厚。在实际生产中,薄膜均匀性是一个很重要的指标,特别是在晶圆片尺寸放大时更为突出。因此,除了生长速率外,还必须考虑薄膜生长的均匀性。本实验的薄膜均匀性通过以下方法获得:在3 inch GaAs衬底上选取均匀分布的9个点,测量各个点的厚度,再利用薄膜均匀性公式[(最大值-最小值)/(最大值+最小值)]计算得到。由图7的沉积均匀性曲线可知,沉积功率在50 W到300 W的变化范围内,薄膜的均匀性均在4%以下。沉积功率适中,在100 W到200 W之间时,薄膜均匀性更优异,低于2%。

图8为氮化硅薄膜在不同沉积气压下的生长速率和沉积均匀性曲线图。从图中可以看出,在气压较低为80 Pa时,氮化硅薄膜生长速率极小,几乎为0。在此之后,薄膜生长速率随气压的增大而提高。而在

200 Pa后,速率略有下降。沉积气压的高低直接影响胺基硅前驱物的浓度。气压越高,前驱物浓度越大,沉积速度自然越大。但增大沉积气压使前驱物浓度提高的同时,也会加大气体分子之间的碰撞几率,降低前驱物的平均自由程和沉积速率。在沉积气压超过200 Pa后,分子平均自由程对沉积速率的影响已经超过了前驱物浓度,沉积速率开始下降。从图8的沉积均匀性变化图可以看出,薄膜的均匀性随着沉积气压的增大而变差,但全部均在工艺生产要求的5%以内。

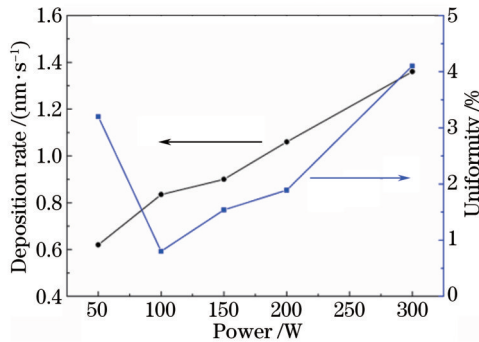


图7 氮化硅薄膜的沉积速率、均匀性与沉积功率的关系图

Fig.7 Deposition rate and uniformity of SiN films as a function of the deposition power

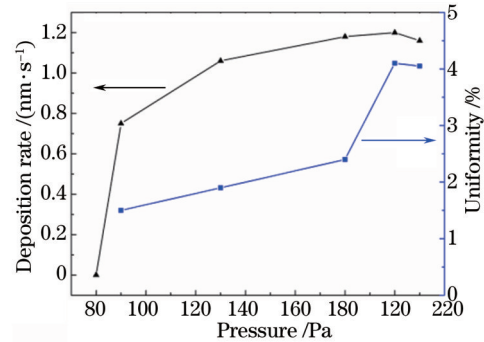


图8 氮化硅薄膜的沉积速率、均匀性与沉积气压的关系图

Fig.8 Deposition rate and uniformity of SiN films as a function of the deposition pressure

4 结 论

采用PECVD方法在GaAs衬底片上和150℃低温条件下制备了不同工艺参数的氮化硅薄膜,详细研究了沉积功率和气压对薄膜残余应力、表面粗糙度、折射率、化学键结构和沉积均匀性的影响规律。得到如下结论:氮化硅薄膜的残余应力随着沉积功率的增加而不断变大。在沉积气压从90 Pa增大到200 Pa时,薄膜残余应力从538 MPa降低至6 MPa。再次提高气压,薄膜应力却开始变大。氮化硅薄膜的表面粗糙度随着沉积功率的提高而变大;而随着沉积气压的提高而减小。沉积功率和沉积气压对氮化硅薄膜的折射率影响均不大。不同功率和气压条件下沉积的氮化硅薄膜其折射率均在2.0~2.2之间。FTIR结果表明氮化硅薄膜中氢的存在形式为N-H键,振动模式以弯曲振动为主。在不同功率和气压范围内,薄膜的沉积均匀性均在5%以下。综上所述,为了获得优异的氮化硅薄膜应用于AlGaAs激光器中,最优的制备工艺为沉积功率50 W,沉积气压200 Pa。

参 考 文 献

- 1 B Vogl, A M Slade, S C Pritchard. The use of silicon nitride in buried contact solar cells[J]. Sol Energ Mater & Sol C, 2001, 66(1): 17-25.
- 2 N Ishikura. Broadband rugate filters based on porous silicon[J]. Opt Mater, 2008, 31(1): 102-105.
- 3 A G Aberle. Overview on SiN surface passivation of crystalline silicon solar cells[J]. Sol Energ Mater Sol C, 2001, 65(1): 239-248.
- 4 J Yoo, S K Dhungel, J Yi. Properties of plasma enhanced chemical vapor deposited silicon nitride for the application in multicrystalline silicon solar cells[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(12): 5000-5003.
- 5 J S Wei, P L Ong, F Tay, *et al.*. A new fabrication method of low stress PECVD SiN layers for biomedical applications [J]. Thin Solid Films, 2008, 516(16): 5181-5188.
- 6 D H Kim, K S Oh, S Park. Design and analysis of a twisting-type thermal actuator for micromirrors[J]. J Mech Sci Technol, 2009, 23(6): 1536-1543.
- 7 Wang Ying, Shen Dezhen, Zhang Jiying, *et al.*. Influence of thermal annealing on the structural and optical properties of Si-rich silicon nitride films[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2005, 20(1): 18-21.
王 颖, 申德振, 张吉英, 等. 退火对富硅氮化硅薄膜的结构和发光的影响[J]. 液晶与显示, 2005, 20(1): 18-21.
- 8 Wang Ying, Shen Dezhen, Zhang Jiying, *et al.*. Photoluminescence study of silicon nitride films with different Si-rich degrees[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2005, 20(2): 103-106.

- 王颖, 申德振, 张吉英, 等. 富硅量不同的富硅氮化硅薄膜的光致发光研究[J]. 液晶与显示, 2005, 20(2): 103-106.
- 9 S Andrei, S Denis, N Arokia, *et al.*. Dielectric performance of low temperature silicon nitride films in α -Si HTFTs[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2002, 299-302(2): 1360-1364.
- 10 G Lavareda, D C Nunes, A Amaral, *et al.*. Dependence of TFT performance on the dielectric characteristics[J]. *Thin Solid Film*, 2003, 427(1): 71-76.
- 11 Xie Zhenyu, Long Chunping, Deng Chaoyong, *et al.*. Effect of high deposition rate on chemical bonds and properties of SiN film[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(1): 26-31.
- 谢振宇, 龙春平, 邓朝勇, 等. 高速沉积氮化硅薄膜对其化学键及性能的影响[J]. 液晶与显示, 2007, 22(1): 26-31.
- 12 Wang Shoukun, Sun Liang, Hao Zhaohui, *et al.*. Pin effect on SiN_x and α -Si layer of thin film transistor[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 613-617.
- 王守坤, 孙亮, 郝昭慧, 等. 基板支撑梢对 TFT 栅界面 SiN_x 和 α -Si 成膜特性的影响[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 613-617.
- 13 Zhong Gang, Hou Lifeng, Wang Xiaoman. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with AlN film passivation layer[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0902002.
- 钟钢, 侯立峰, 王晓曼. 基于 AlN 膜钝化层的高功率垂直腔面发射激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902002.
- 14 D L Wainstein, A I Kovalev, C Ducso, *et al.*. X-ray photoelectron spectroscopy investigations of Si in non-stoichiometric SiN_x LPCVD multilayered coatings[J]. *Phys E*, 2007, 38(2): 156-159.
- 15 M Molinari, H Rinnert, M Vergnat. Preparation of dense, smooth and homogeneous amorphous silicon nitride films by nitrogen-ion-beam assisted evaporation[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41(17): 175410.
- 16 F Rebib, E Tomasella, M Dubois, *et al.*. SiO_xN_y thin films deposited by reactive sputtering: Process study and structural characterization[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(7): 3480-3487.
- 17 Lin Juan, Yang Peizhi, Hua Qilin. Microstructure and luminous property of multilayer SiN_x/Si/SiN_x thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0231003.
- 林娟, 杨培志, 化麒麟. 多层 SiN_x/Si/SiN_x 薄膜的微结构及其发光性能[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0231003.
- 18 M Parviziyan, F R Ashtari, A Goodarzi, *et al.*. Residual stress improvement of platinum thin film in Au/Pt/Ti/p-GaAs ohmic contact by RF sputtering power[J]. *Appl Surf Sci*, 2012, 260: 77-79.
- 19 A Picciotto, A Bagolini, P Bellutti, *et al.*. Influence of interfaces density and thermal processes on mechanical stress of PECVD silicon nitride[J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 256(1): 251-255.
- 20 Zhang Yaoping, Zhang Yundong, Ling Ning, *et al.*. Finite element analysis based on the residual stress of thin film[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(10): 23-26.
- 张耀平, 张云洞, 凌宁, 等. 薄膜残余应力有限元分析研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(10): 23-26.
- 21 Zhang Siyu, Qiao Zhongliang, Zhou Lu, *et al.*. Ring semiconductor laser with multi-ring coupling structure[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0202004.
- 张斯钰, 乔忠良, 周路, 等. 带有多环耦合结构的环形半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202004.
- 22 Wang Lijie, Tong Cunzhu, Tian Sicong, *et al.*. A study of characteristics of asymmetric bragg reflection waveguide diode lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 091401.
- 汪丽杰, 佟存柱, 田思聪, 等. 非对称布拉格发射波导半导体激光器的特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 091401.
- 23 Dong Wei, Zuo Ran, Lai Xiaohui, *et al.*. Simulation of stresses in GaN thin film on sapphire[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 073101.
- 董位, 左然, 赖晓慧, 等. 蓝宝石基 GaN 薄膜的热应力模拟分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 073101.
- 24 B Karunakaran, S J Chung, S Velumani, *et al.*. Effect of rapid thermal annealing on the properties of PECVD SiN_x thin films[J]. *Mater Chem Phys*, 2007, 106(1): 130-133.

栏目编辑: 张浩佳